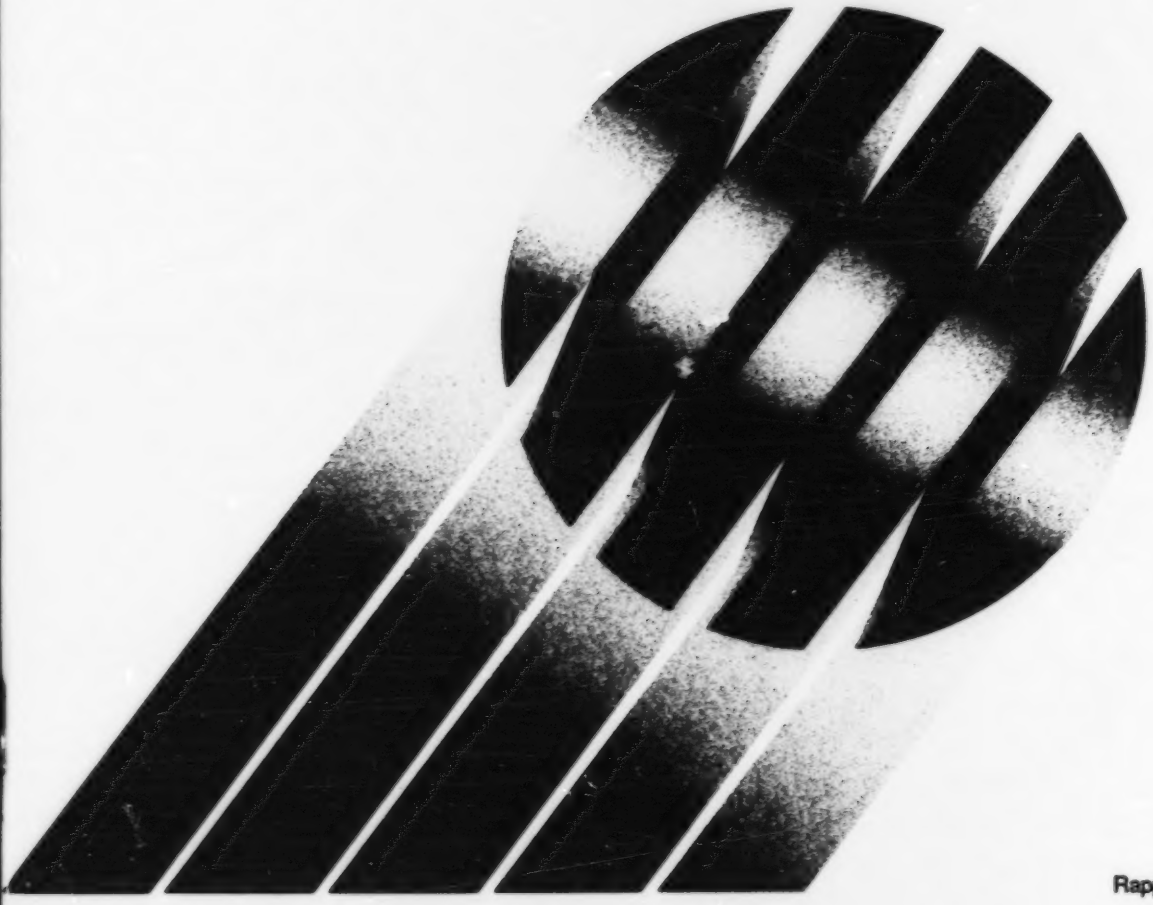
CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Caractéristiques du mineral influant sur la fragmentation pendant le broyage

W. Petruk et M.M. Smith
Laboratoire de traitement des minéraux



Rapport de CANMET 88-5F

Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

Canada

THE ENERGY OF OUR RESOURCES · THE POWER OF OUR IDEAS

L'ENERGIE DE NOS RESSOURCES · NOTRE FORCE CREATRICE

CARACTÉRISTIQUES DU MINERAI INFLUANT SUR LA FRAGMENTATION PENDANT LE BROYAGE

W. PETRUK et M.M. SMITH
Laboratoire de traitement des minéraux

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DE CANMET 88-5F

26 pp

mai 1988

MICROMEDIA

91-05458/

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres librairies

ou par la poste auprès du

Groupe Communication Canada – Édition
Ottawa, Canada K1A 0S9

Cat. No. M38–13/88–5F
ISBN 0–660–93231–8

CARACTÉRISTIQUES DU MINERAI INFLUANT SUR LA FRAGMENTATION PENDANT LE BROYAGE

par

W. Petruk* et M.M. Smith**

Résumé

On a analysé un minerai de métal commun provenant du dépôt n° 12 de la région de Bathurst au Nouveau-Brunswick afin de déterminer la mécanique de la rupture pendant le broyage. Le minerai a été broyé pendant des périodes plus ou moins longues dans un broyeur à boulets. Le minerai non fragmenté et les produits broyés ont fait l'objet d'une étude qui a été réalisée par diverses techniques d'analyse d'images, y compris des analyses fractales modifiées.

Les résultats indiquent que le mode de rupture est très influencé par le comportement de la pyrite. Le broyage préliminaire fragmente la pyrite en travers des limites de grain (i.e., rupture préférentielle) et le procédé continue jusqu'à ce que la majorité des grains de pyrite, peu ou moyennement agglomérés, soient séparés. Un broyage plus poussé brise la pyrite en travers des limites de grain (rupture aléatoire) et fragmente les particules. Ce fait indique que la libération des minéraux interstitiels retrouvés parmi la pyrite dans le minerai de métal commun repose davantage sur la rupture préférentielle, en travers des limites de grain de pyrite, que sur la rupture aléatoire du minerai, comme on le pense en général. Par conséquent, les minéraux interstitiels retrouvés parmi la pyrite sont habituellement plus petits que les grains de pyrite et seront libérés sous une forme plus grossière que prévue dans le cas d'une fragmentation aléatoire du minerai.

MOTS CLÉS : libération; analyse de la texture; analyse d'image; érosion du grain; dilatation du grain.

---

*Chercheur scientifique principal et **boursier-post doctoral, Section de la minéralogie appliquée, Laboratoires des sciences minérales, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0G1.

ORE CHARACTERISTICS THAT AFFECT BREAKAGE DURING GRINDING

by

W. Petruk* and M.M. Smith**

Abstract

A base metal ore from the New Brunswick No. 12 deposit in the Bathurst area, New Brunswick, was studied to determine the mechanics of ore breakage during grinding. The ore was ground for different periods of time in a laboratory ball mill, and both the unbroken ore and ground products were analyzed by a variety of image analysis techniques, including modifications of fractal analyses.

The results show that the mode of breakage is strongly influenced by the behaviour of pyrite. Initial grinding breaks pyrite along grain boundaries (i.e., preferential breakage), and the process continues until most of the poorly to moderately bonded pyrite grains have been separated. Further grinding breaks pyrite across grain boundaries (random breakage) and chips edges off particles. This observation indicates that liberation of interstitial minerals among pyrite in base metal ores is more dependent upon preferential breakage, along pyrite grain boundaries, than upon random breakage of the ore, as generally assumed. Consequently, the interstitial minerals among pyrite, which are generally smaller than the pyrite grains, will be liberated at a coarser grind than would be expected if the ore broke randomly.

KEYWORDS: liberation, texture analysis, image analysis, grain erosion, grain dilation.

---

*Senior Research Scientist and **Post-doctoral fellow, Process Mineralogy Section, Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Ontario K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i
ABSTRACT iii
INTRODUCTION 1
IDENTIFICATION ET GRANULOMÉTRIE DES MINÉRAUX DANS LE MINERAI NON FRAGMENTÉ 1
ESSAIS DE BROYAGE 1
QUANTITÉS DE MINÉRAUX DANS LES PRODUITS DE BROYAGE 8
ANALYSES DE TEXTURE 8
Érosion séquentielle des grains avec mesures du périmètre dans le champ de vision 12
Dilatation des grains avec mesures du périmètre dans le champ de vision 12
Dilatation de l'érosion avec mesures du périmètre dans le champ de vision 13
Mesures de surface et de périmètre 13
ANALYSE 17
RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS 20
REMERCIEMENTS 20
RÉFÉRENCES 21

TABLEAUX

1. Identification des minéraux et quantités 2
2. Granulométrie des échantillons 4
3. Résumé des indicateurs de texture 19

FIGURES

1. Micrographie par électrons rétrodiffusés (ERD) d'un minerai de métal commun 3
2. Analyse granulométrique du produit du broyeur à barres, du minerai broyé après diverses intervalles de temps, de la charge de flottation du concentrateur de la BMS et de la pyrite dans le minerai non broyé 5
3. Analyse granulométrique de la pyrite dans le minerai broyé après 15, 30, 45, 60 et 90 minutes, et de la pyrite dans le minerai non broyé 6
4. Quantités de minéraux dans les fractions tamisées du produit du broyeur à barres et du minerai broyé après 15, 30, 45, 60 et 90 minutes 9
5. Image de la ERD d'un minerai de métal commun produite par le système d'analyse d'images 10
6. Tracé de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape, les plus fortes discontinuités dans la pente se produisant à 33 et 42 µm 11
7. Tracé de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape, les plus fortes discontinuités dans la pente se produisant à 9 et 33 µm 14
8. Tracé des variations de la pente érosion–dilatation de la pyrite pour 210 champs 15
9. Tracé de P^2/A en fonction de A pour 1472 grains d'un même échantillon 16
10. Images binaires montrant la pyrite en blanc 18

INTRODUCTION

La mécanique de la fragmentation du minerai pendant le broyage n'est pas assez connue pour mettre au point un modèle de libération adéquat. Les modèles de libération existants supposent que la fragmentation est aléatoire pour prévoir la libération des minéraux (1, 2, 3) et donne de bonnes corrélations lorsque la fragmentation aléatoire est apparente. Cependant, les corrélations ne sont pas bonnes lorsque la fragmentation aléatoire n'est pas apparente (4, 5, 6, 7). Cela indique qu'il y a fragmentation tant aléatoire que préférentielle pendant le concassage et le broyage. La fragmentation se produirait a) suivant des fractures naissantes (fragmentation préférentielle), b) suivant des couches et des veinules de minéraux tendres (fragmentation préférentielle), c) suivant les limites de grain (fragmentation préférentielle), d) en travers des limites de grain (fragmentation aléatoire) et e) par éclatement des bords des particules (fragmentation aléatoire). L'importance de chaque type de fragmentation pendant le broyage d'un minerai de métal commun dans un broyeur à boulets a été étudiée par l'analyse du minerai du gisement Brunswick n° 12 de la Brunswick Mining and Smelting Corp. Ltd. (BMS) près de Bathurst (N.-B.). Des essais de broyage ont été menés, et des échantillons polis des fractions tamisées provenant des essais de broyage, ainsi que des morceaux de minerai non fragmentés, ont été analysés au moyen du système d'analyse des images.

IDENTIFICATION ET GRANULOMÉTRIE DES MINÉRAUX DANS LE MINERAI NON FRAGMENTÉ

Un échantillon de charge de broyeur à barres (CBB), composé de morceaux de -2,5 cm, a été fourni par BMS en août 1986. Vingt morceaux de 2,5 cm ont été choisis au hasard, et des échantillons ont été préparés. Onze échantillons polis ont été analysés au moyen du système d'analyse des images dans le but d'en identifier les minéraux, de les quantifier et d'en établir la granulométrie (tableau 1). La granulométrie de la pyrite n'a pu être établie directement parce que la pyrite se présente surtout sous forme d'agrégats de grains; par conséquent, il a fallu recourir à une technique de reconstitution des limites de grains (8) (fig. 1). L'image reconstituée représente chaque grain de pyrite comme un élément distinct et permet donc de mesurer sa taille. La granulométrie a été établie par analyse des longueurs de corde des grains de pyrite reconstitués dans les images du minerai (8) (tableau 2, col. 8).

ESSAIS DE BROYAGE

L'échantillon de CBB a été réduit dans un broyeur à barres de laboratoire à -1,7 mm (-10 mesh) et a été divisé en cinq échantillons de 2 kg. Dans un broyeur à boulets en acier, un échantillon a été réduit pendant 15 minutes, le deuxième pendant 30 minutes, le troisième pendant 45 minutes, le quatrième pendant 60 minutes et le cinquième pendant 90 minutes. Chaque produit broyé a été tamisé dans une série de tamis de 600 à 37,5 µm (28 à 400 mesh). La taille des grains dans les fractions de -37,5 µm a été établie par l'analyseur d'images. La granulométrie du produit du circuit de broyage de la BMS de septembre 1976 (9) et de décembre 1986 (tableau 2) a aussi été analysée.

Tableau 1 – Identification des minéraux et quantités

Minéral	Minerai non fragmenté	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min
Silicates*	18,0	22,9	20,9	23,3	21,0	24,0
Pyrite**	60,3	52,1	56,1	54,5	58,1	55,3
Pyrrhotite	0,9	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4
Chalcopyrite	0,8	0,7	0,5	0,6	0,3	0,4
Sphalérite	14,5	16,4	16,3	15,8	15,1	14,5
Arsénopyrite***	1,9	2,7	2,3	2,1	2,1	2,3
Galène	3,6	4,7	3,5	3,5	3,1	3,1

* Surtout du quartz, mais avec du mica, du feldspath, de l'amphibole, de la chlorite, de la calcite, de la sidérite, de la dolomite, de l'apatite et de la géothite.

** Environ 99,9 % de pyrite, mais peut contenir de la magnétite, de l'hématite et du zircon.

*** Comprend de la barytine, de la tétraédrite, de la cassitérite, de la boulangerite et de la pyrargyrite.

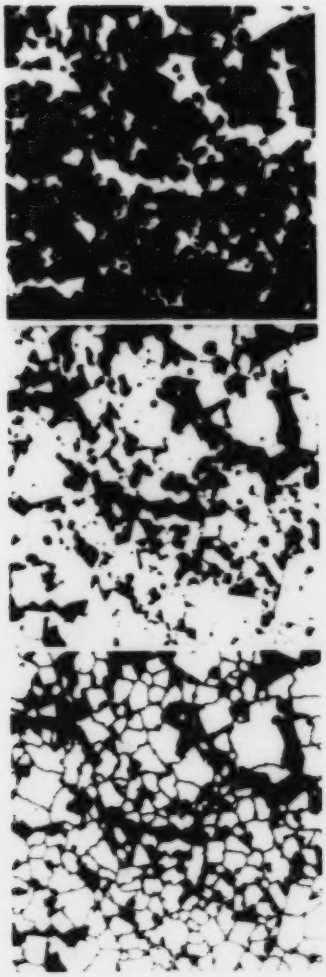


Fig. 1 – a) Micrographie par électrons rétrodiffusés (ERD) d'un minerai de métal commun montrant de la pyrite (gris), de la sphalérite (blanc mat), de la gangue (noir) et de la galène (taches blanches brillantes); b) Image binaire produite par le système d'analyse d'images pour la pyrite de la figure 1 a); c) Image binaire de la figure 1 b) avec limites de grain reconstituées.

Tableau 2 – Granulométrie* des échantillons

1 Taille (µm)	2 Tête	3 15 min	4 30 min	5 45 min	6 60 min	7 90 min	8 Pyrite non fragmentée	9 BMS 9/76	10 BMS 12/86
3,4	0,72	3,65	2,87	2,74	4,12	5,29	2,0	2,9	
4,7	1,54	4,86	6,24	6,08	9,66	11,93	3,9	5,9	
6,7	2,84	14,01	11,57	11,42	17,81	21,82	7,6	8,9	
9,3	4,84	21,47	19,43	20,12	30,00	36,70	13,4	13,3	
13,3	7,56	29,77	30,94	33,87	46,95	53,44	20,2	21,0	25,88
18,7	10,43	39,20	46,19	51,55	67,03	70,87	30,8	31,7	31,77
26,6	12,41	49,26	63,31	70,75	85,12	87,55	43,0	43,1	41,84
37,5	14,1	56,48	77,80	89,30	95,20	97,90	55,8	59,9	53,83
53	17,6	71,92	92,25	97,76	99,42	99,60	68,6	77,2	62,73
75	19,7	82,74	96,99	99,27	99,87	99,80	80,1	85,6	81,61
106	22,3	92,34	99,29	99,87	99,97	99,93	88,9	90,2	87,81
150	25,2	97,57	99,84	99,95	100,00	99,98	94,3		94,32
212	29,0	99,40	99,89	100,00		100,00	97,0	97,1	97,08
300	33,6	99,60	99,92						
424	48,9	99,65	99,95						
+424	51,5	00,35	00,05	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00

* = % inférieur à

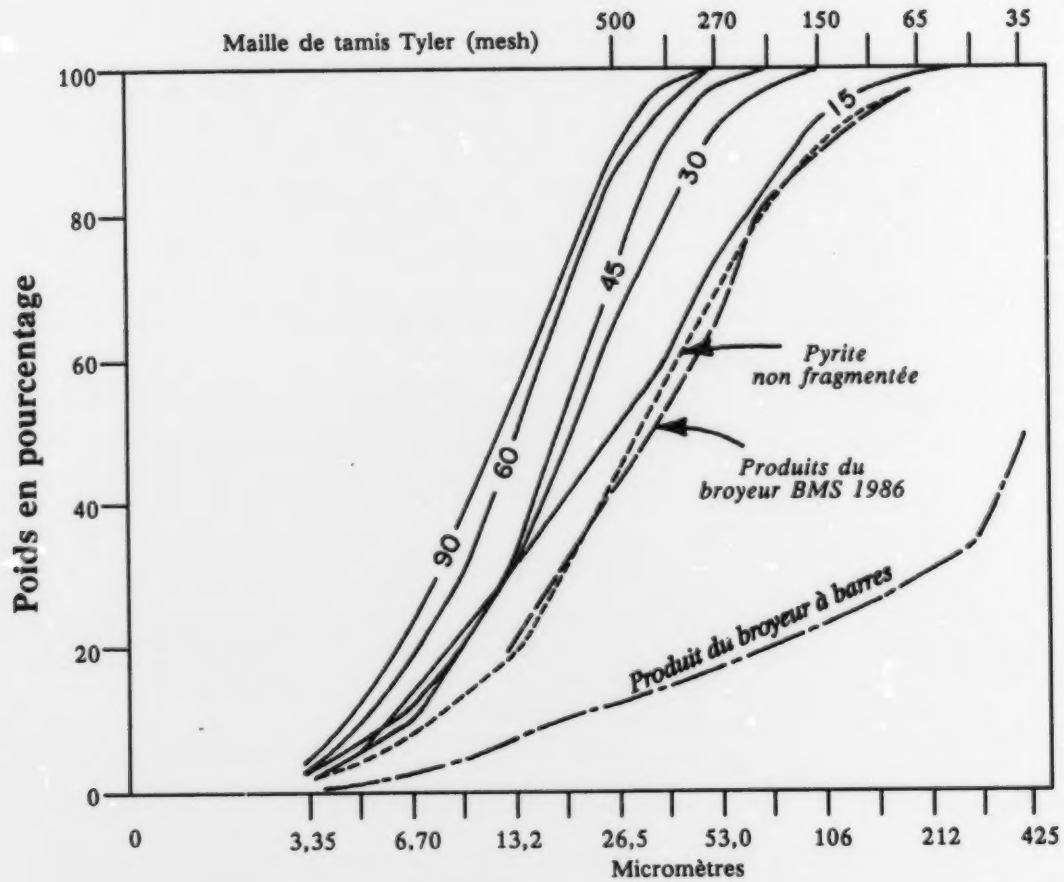


Fig. 2 – Analyse granulométrique du produit du broyeur à barres, du minerai broyé après diverses intervalles de temps, (15, 30, 45, 60 et 90 minutes), de la charge de flottation du concentrateur de la BMS et de la pyrite dans le minerai non broyé.

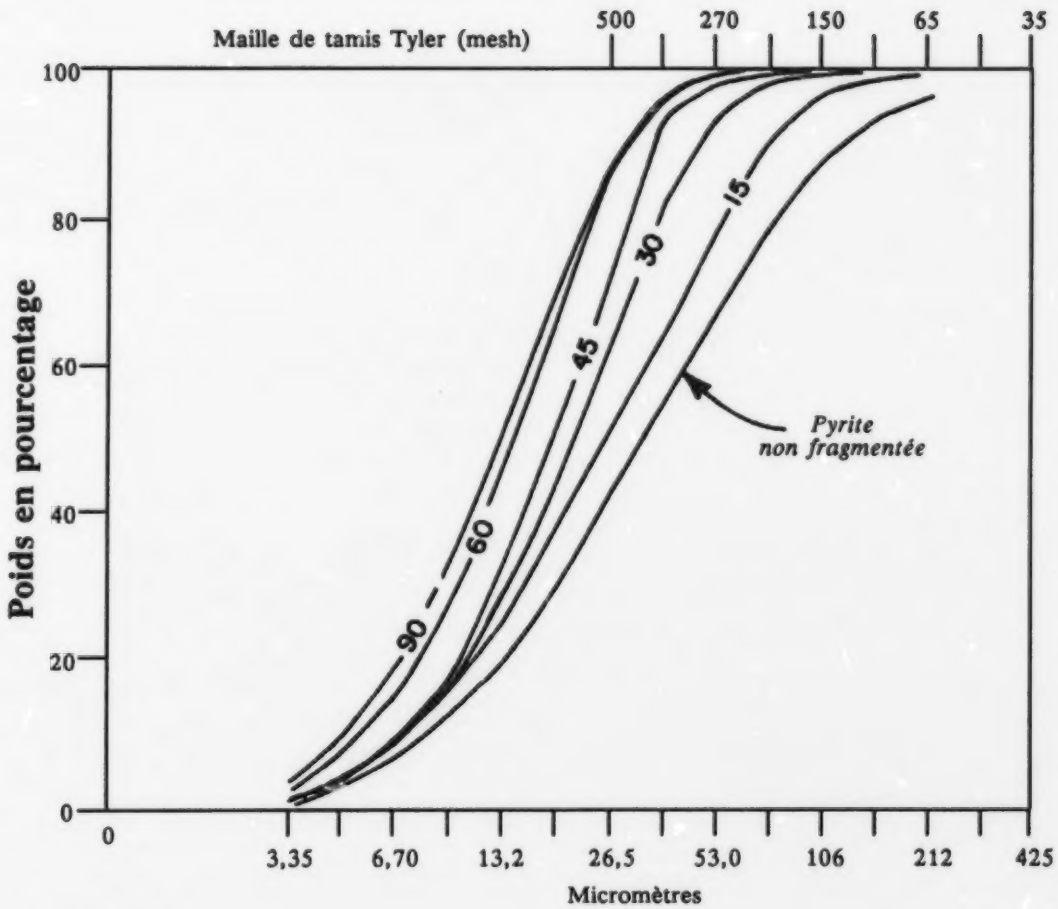


Fig. 3 – Analyse granulométrique de la pyrite dans le minerai broyé pendant 15, 30, 45, 60 et 90 minutes, et de la pyrite dans le minerai non broyé.

La comparaison des colonnes 3, 8, 9 et 10 du tableau 2 révèle que des granulométries semblables ont été obtenues pour le matériau réduit pendant 15 minutes au broyeur à boulets du laboratoire, pour les produits du circuit de broyage de la BMS et pour les grains de pyrite dans le minerai non fragmenté (fig. 2). Cette similitude indique que le broyeur à boulets de la BMS fragmente le minerai en particules de taille presqu'égale à celle des grains de pyrite dans le minerai.

Pour déterminer si cette observation s'applique aux minerais de métaux communs en général ou uniquement au minerai de la BMS, on a mené des essais sur des minerais de métaux communs du gisement de Trout Lake de la Hudson Bay Mining and Smelting au Manitoba et du gisement de la Curragh Resources (gisement de Faro) au Yukon. Une relation semblable a été observée entre les granulométries des produits de broyage et celles de la pyrite du minerai non fragmenté du gisement de Trout Lake, mais pas du gisement de la Curragh Resources. Le minerai de Trout Lake est riche en pyrite et en quartz et, comme dans le minerai de la BMS, la sphalérite est plus grossière que la pyrite. Par contre, le minerai de la Curragh tire davantage de minéraux mafiques et la sphalérite est plus fine que la pyrite. Ces observations indiquent que lorsque les minerais de métaux communs riches en pyrite sont broyés, soit dans un broyeur de laboratoire pendant 15 minutes, soit dans un broyeur commercial, les granulométries des particules dans le minerai broyé sont voisines de celles des grains de pyrite dans le minerai non fragmenté. Une fragmentation plus poussée dans un broyeur de laboratoire réduit les particules à une taille plus fine.

Une évaluation des courbes de distribution granulométrique des différents produits de broyage (fig. 2) révèle que :

1. la plupart des particules de l'échantillon broyé pendant 15 minutes ont moins de 150 µm de diamètre, ce qui équivaut à la taille maximale des grains de pyrite dans le minerai;

2. les particules de 0 à 13,3 µm dans les échantillons broyés pendant 15, 30 et 45 minutes présentent des granulométries semblables, ce qui indique que les grains de cette tranche granulométrique ont une propriété distincte;

3. les sommets des courbes de distribution granulométrique cumulative pour les produits broyés pendant 30 et 45 minutes se sont déplacés de la plage de 106 à 150 µm observée pour le produit broyé pendant 15 minutes vers la plage de 37,5 à 53 µm. Cette observation indique que le minerai possède des textures qui l'oblige à se fragmenter en particules de 37,5 à 53 µm de diamètre;

4. les courbes de distribution granulométrique cumulative pour les produits broyés pendant 45, 60 et 90 minutes sont parallèles et celles pour les produits broyés pendant 60 et 90 minutes sont peu espacées. Cela indique que la plupart des grains de pyrite ont été fragmentés pendant l'intervalle de 45 minutes (fragmentation préférentielle), et que pendant les intervalles de 60 et 90 minutes, les grains de pyrite ont été fragmentés surtout en travers des limites de grain (fragmentation aléatoire);

5. les courbes de distribution granulométrique des grains de pyrite libres (déterminées par analyse d'images) dans les produits broyés pendant 15, 30, 45, 60 et 90 minutes ressemblent à celles du minerai broyé. Cette similitude confirme l'interprétation voulant que la taille et la texture des grains de pyrite influent sur la fragmentation des minerais de métaux communs.

QUANTITÉS DE MINÉRAUX DANS LES PRODUITS DE BROYAGE

Les minéraux ont été quantifiés au moyen de l'analyseur d'images, par tranche tamisée et pour chaque essai de broyage. Les résultats montrent de nettes variations de quantité de minéraux dans les tranches granulométriques de 104 à 147 et de 36,8 à 52,1 µm (fig. 4). Dans le produit du broyeur à barres, où les minéraux se présentent surtout sous forme de grains pluriminéraux, la quantité de chaque minéral est à peu près la même que dans chaque fraction tamisée. Dans les produits broyés pendant 15 et 30 minutes, la quantité de pyrite diminue et celle des silicates augmente dans les fractions de 104 à 147 µm et dans les fractions plus grossières. Cette observation indique que, comme la pyrite dans le minerai non fragmenté est essentiellement composée de grains de diamètre inférieur à 150 µm (selon l'analyse granulométrique de la pyrite dans le minerai non fragmenté), elle se fragmente en particules de moins de 150 µm. Par conséquent, la quantité de pyrite dans les fractions plus grossières est réduite. Les produits broyés pendant 60 et 90 minutes présentent un épuisement de la pyrite dans les fractions supérieures à 44 µm, ce qui indique que presque tous les grains de pyrite de plus de 44 µm ont été fragmentés, et que leur quantité a été réduite. Cette observation signifie que le minerai possède une propriété qui le force à se fragmenter en particules de moins de 44 µm.

ANALYSES DE TEXTURE

Pour déterminer si les tranches de 0 à 13 et de 37,5 à 53 µm dépendent des propriétés du minerai, on a mis au point et à l'essai quatre techniques pour mesurer les interrelations entre des grains de pyrite de tailles différentes par analyse d'images. Les techniques sont les suivantes :

1. érosion séquentielle des grains avec mesure du périmètre dans le champ;
2. dilatation séquentielle des grains avec mesure du périmètre dans le champ;
3. combinaison d'érosion et de dilatation des grains avec mesures du périmètre dans le champ; et
4. mesure surface-périmètre de chaque particule.

Pour obtenir des données statistiquement valides, on a mesuré vingt champs (5 000 à 10 000 grains) pour chaque échantillon poli. Les données des 11 échantillons polis ont été combinés (55 000 à 110 000 grains ont été mesurés). Dans les essais sur des interrelations particulières entre grains, observés seulement dans un champ de vision, de 250 à 500 grains ont été mesurés (10).

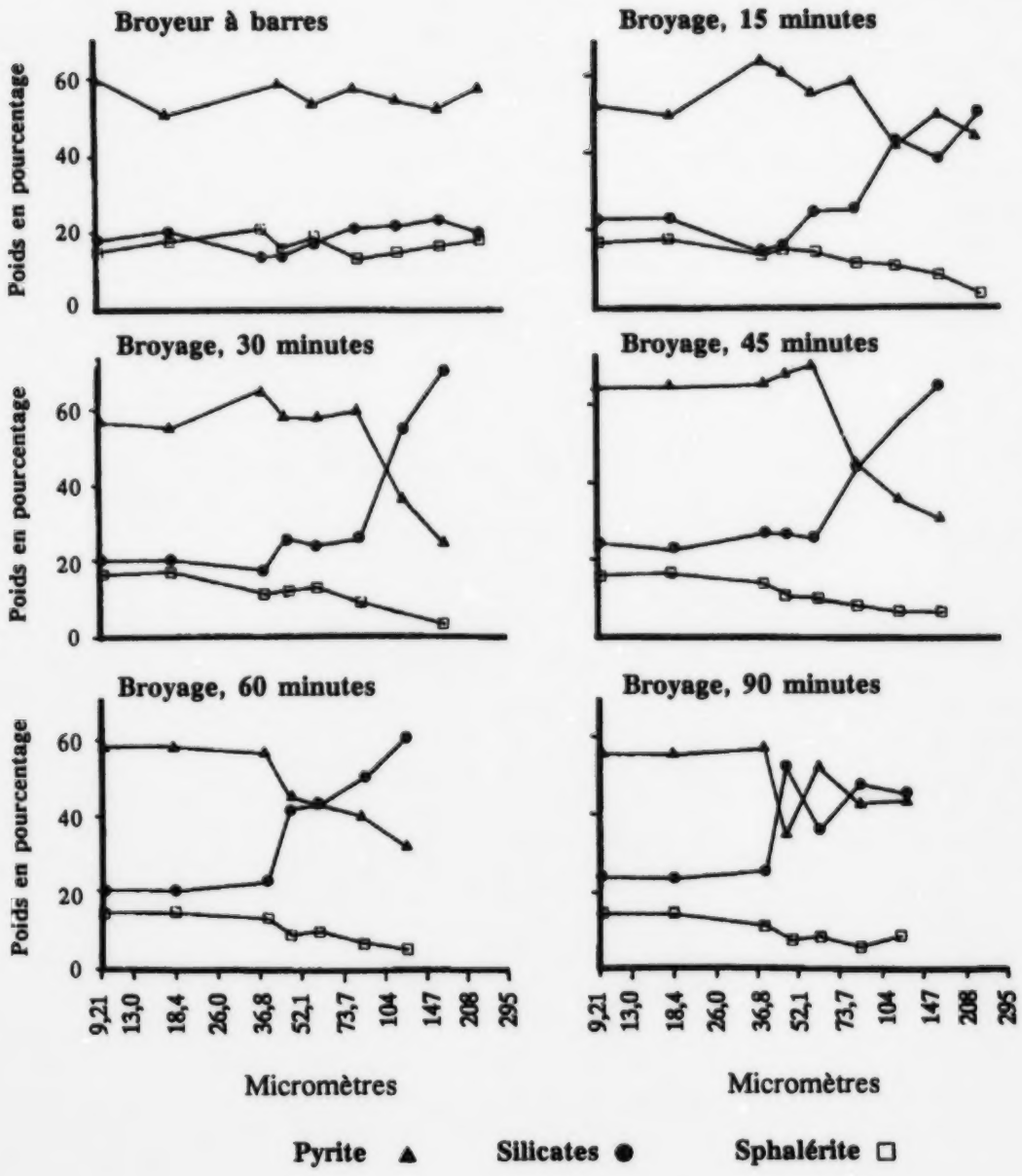


Fig. 4 – Quantités de minéraux dans les fractions tamisées du produit du broyeur à barres, et du minerai broyé pendant 15, 30, 45, 60 et 90 minutes.

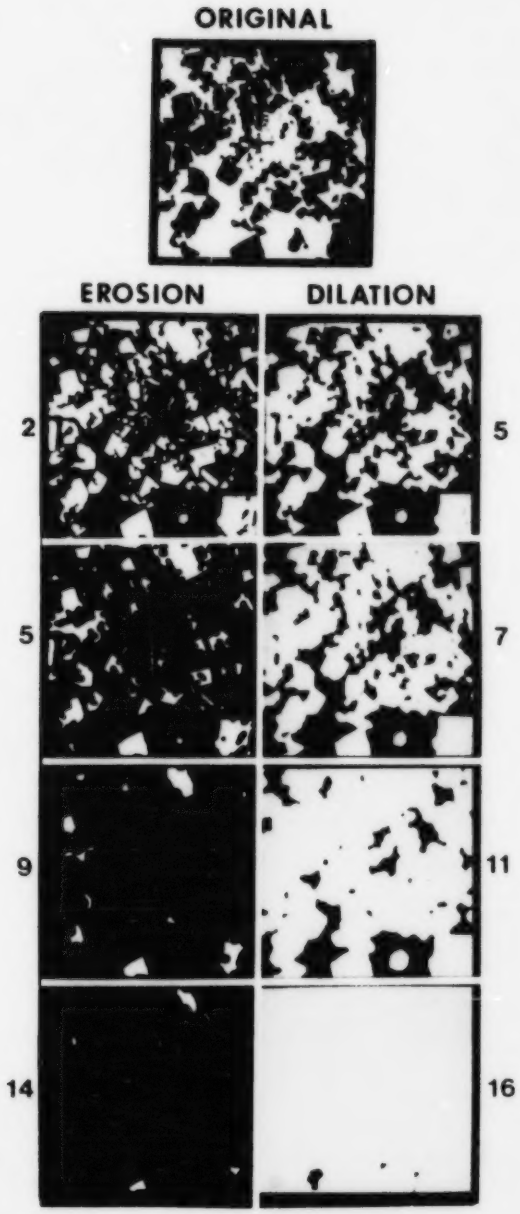


Fig. 5 – Image de la ERD d'un minerai de métal commun produite par le système d'analyse des images. La pyrite est grise; la sphalérite est gris pâle; et la gangue est noire. La colonne de gauche représente la même image érodée deux, cinq, neuf et quatorze fois. La colonne de droite représente la même image dilatée cinq, sept, onze et seize fois.

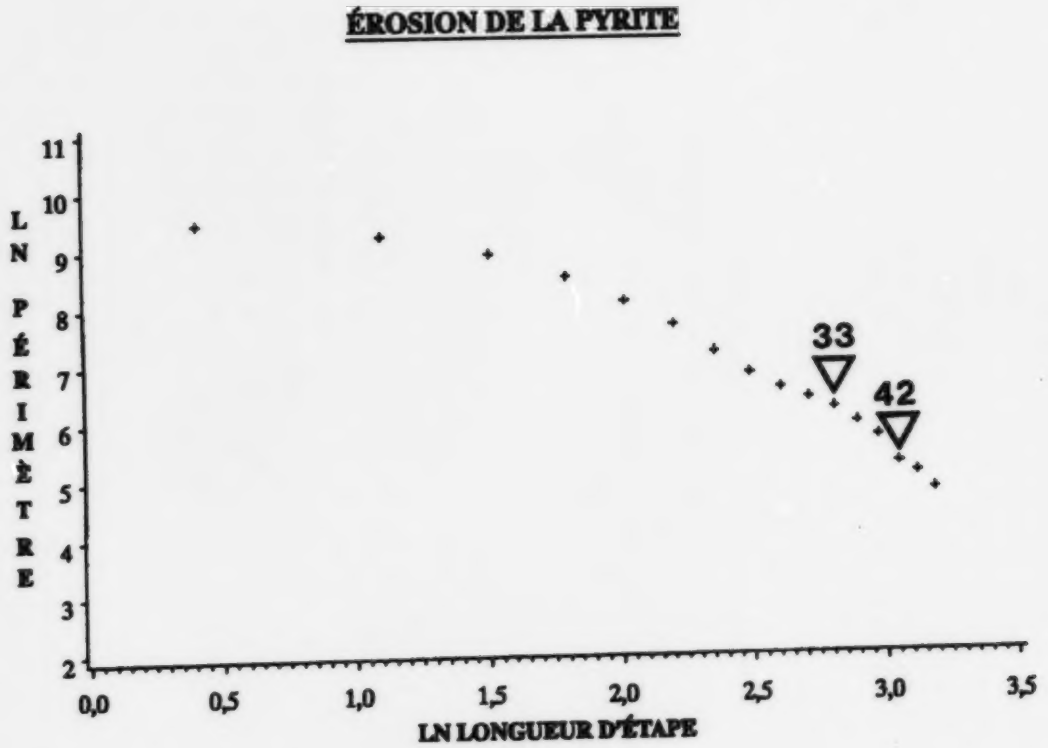


Fig. 6 – Tracé de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape. Chaque étape représente une érosion de 1,5 µm autour de chaque grain ou de 3 µm du diamètre du grain. Les plus fortes discontinuités dans la pente se produisent à 33 et 42 µm.

Érosion séquentielle des grains avec mesures du périmètre dans le champ de vision

Une technique d'érosion a été mise au point en modifiant une technique d'analyse fractale (10, 11). Elle consiste à enlever successivement une couche (érosion) d'un pixel de large, de l'image de chaque grain dans le champ de vision et à mesurer le périmètre total pour les grains contenus dans l'image après chaque érosion. L'érosion se fait en 16 étapes (fig. 5). Le périmètre du champ mesuré pour chaque étape d'érosion a été représenté sous forme du ln périmètre en fonction du ln longueur d'étape (fig. 6). La longueur d'étape dépend du grossissement; dans les conditions d'analyse utilisées (grossissement = 150x), le diamètre des grains diminuait de 3 µm pour chaque longueur d'étape. La pente de la courbe résultante a été établie pour chaque étape et les discontinuités de la pente ont été notées. La plus forte discontinuité s'est produite à 42 µm, indiquant un changement dans les relations entre les gros et les petits grains de pyrite. Comme cette taille tombe dans la plage de 37,5 à 53 µm découlant des données sur le broyage et les quantités de minéraux, on peut dire que le changement dans les relations entre les grains de pyrite influe sur la fragmentation pendant le broyage.

L'érosion élimine les irrégularités sur le pourtour des images des grains et réduit la taille des images des grains. En outre, le grain disparaît lorsque son diamètre est inférieur à la taille des étapes d'érosion combinées (fig. 5). La diminution de la pente de la courbe de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape est donc une mesure des irrégularités de la surface des grains et de leur diamètre (9).

Dilatation des grains avec mesures du périmètre dans le champ de vision

Une technique de dilatation des grains reposant sur un principe semblable à celui des techniques d'érosion des grains a aussi été mise au point. L'image de chaque grain a été successivement dilatée d'un pixel (fig. 5), et le périmètre des grains dans le champ a été mesuré après chaque dilatation. Les données ont été représentées sous forme du ln périmètre en fonction du ln étape de dilatation, et les pentes des courbes résultantes ont été calculées d'une dilatation à l'autre. Pour l'image paraissant à la figure 5 (un champ de vision), les plus fortes discontinuités dans la pente de la courbe dilatation se sont produites à 9 et 33 µm (fig. 7).

La dilatation modifie l'image des grains en augmentant le diamètre des grains et en arrondissant leur pourtour. Lorsque les grains sont très espacés, chaque étape de dilatation augmente le périmètre par un facteur constant et la courbe de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape est une droite. Par ailleurs, lorsque les grains sont rapprochés, la dilatation agglutine les grains en remplissant les espaces intergranulaires, réduisant ainsi le périmètre. Les données combinées pour tous les champs analysés dans les 11 échantillons polis montrent que la plus forte discontinuité dans la pente se produit à 6 µm, ce qui indique que la plupart des interstices entre les grains de pyrite ont moins de 6 µm.

Dilatation de l'érosion avec mesures du périmètre dans le champ de vision

Pour mieux déceler les variations de texture de la pyrite, on a représenté la pente moyenne d'une dilatation à l'autre pour les 11 échantillons en fonction de la pente moyenne d'une érosion à l'autre. La combinaison des techniques de l'érosion et de la dilatation permet de mesurer la taille, la rugosité et la séparation des grains. La technique d'érosion–dilatation peut donc être une méthode valide pour déterminer les relations entre les grains. On a observé que les points étaient séparés chaque fois qu'il y avait une forte discontinuité dans la pente. Les données combinées pour la pyrite (fig. 8) révèlent une grande séparation à 6 µm et des séparations marquées à 12 et 42 µm. Les séparations se produisent à des tailles qui se situent dans les plages de 0 à 13 et de 37,5 à 53 µm observées dans les essais de broyage, et indiquent que la fragmentation de la pyrite est liée à la taille, à la rugosité et à la séparation des grains.

Mesures de surface et de périmètre

La surface (A) et le périmètre (P) de 1472 particules d'un même échantillon ont été mesurés, et les données ont été représentées dans un graphique de P^2/A en fonction de A (fig. 9). L'essai a été mené dans le but de déterminer la forme et la taille des particules influant sur la fragmentation du minerai. La valeur de P^2/A est de 16 pour un carré et de 12,57 pour un cercle. Elle augmente en fonction de la rugosité des grains et du rapport d'élancement. Une corrélation visuelle de P^2/A en fonction de la forme des grains dans les images indique que des valeurs de 16 à 45 correspondent à des grains qui, dans des échantillons polis, semblent approcher des carrés. Le diagramme de dispersion de P^2/A en fonction de A (fig. 9b) montre que certains grains de moins de 100 μm^2 (diamètre = 10 µm) sont circulaires; certains grains allant jusqu'à 1900 μm^2 (diamètre = 44 µm) sont carrés; et un grand nombre de grains de toutes tailles ont des périmètres irréguliers truffés de rentrants (P^2/A allant jusqu'à 5000). L'irrégularité des grains augmente avec leur taille.

Les diamètres de grain de 10 et 42 µm, observés ci–dessus, correspondent aux tailles relevées dans les courbes de broyage, ce qui indique que la forme et la taille des grains influent aussi sur la fragmentation du minerai pendant le broyage. Les changements dans le diagramme de dispersion sont si subtils que les effets de la forme des grains sur la fragmentation du minerai ne pourraient être décelés si d'autres informations n'étaient pas disponibles.

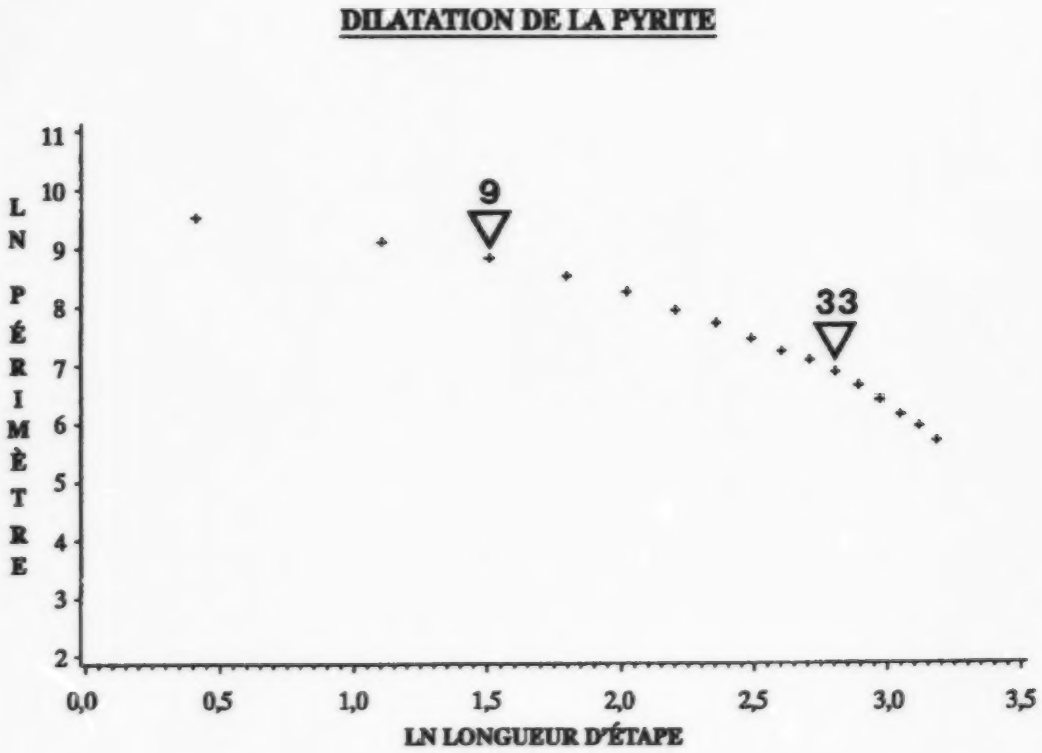


Fig. 7 – Tracé de ln périmètre en fonction de ln longueur d'étape. Chaque étape représente une dilatation de 3 µm pour chaque grain. Les plus fortes discontinuités dans la pente de la courbe de dilatation se produisent à 9 et 33 µm.

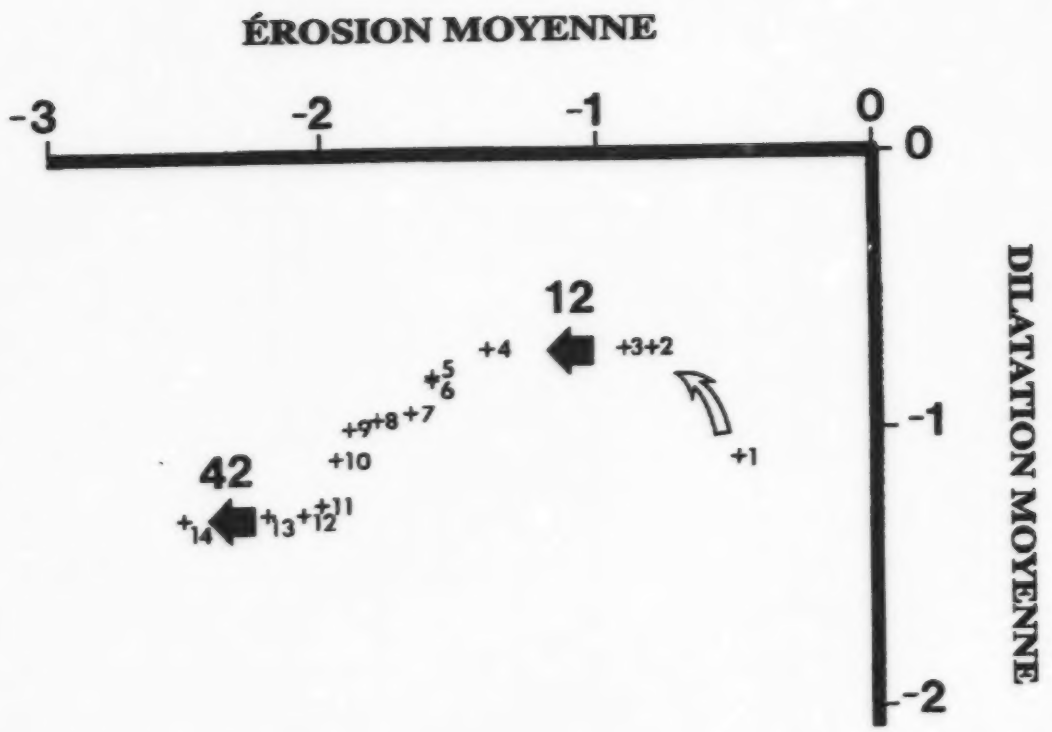


Fig. 8 – Tracé des variations de la pente de la courbe d'érosion de la pyrite en fonction de celles de la courbe de dilatation pour 210 champs (11 échantillons). Les plus fortes discontinuités d'érosion se produisent à 12 et 42 µm. La plus forte discontinuité de dilatation se produit à 6 µm.

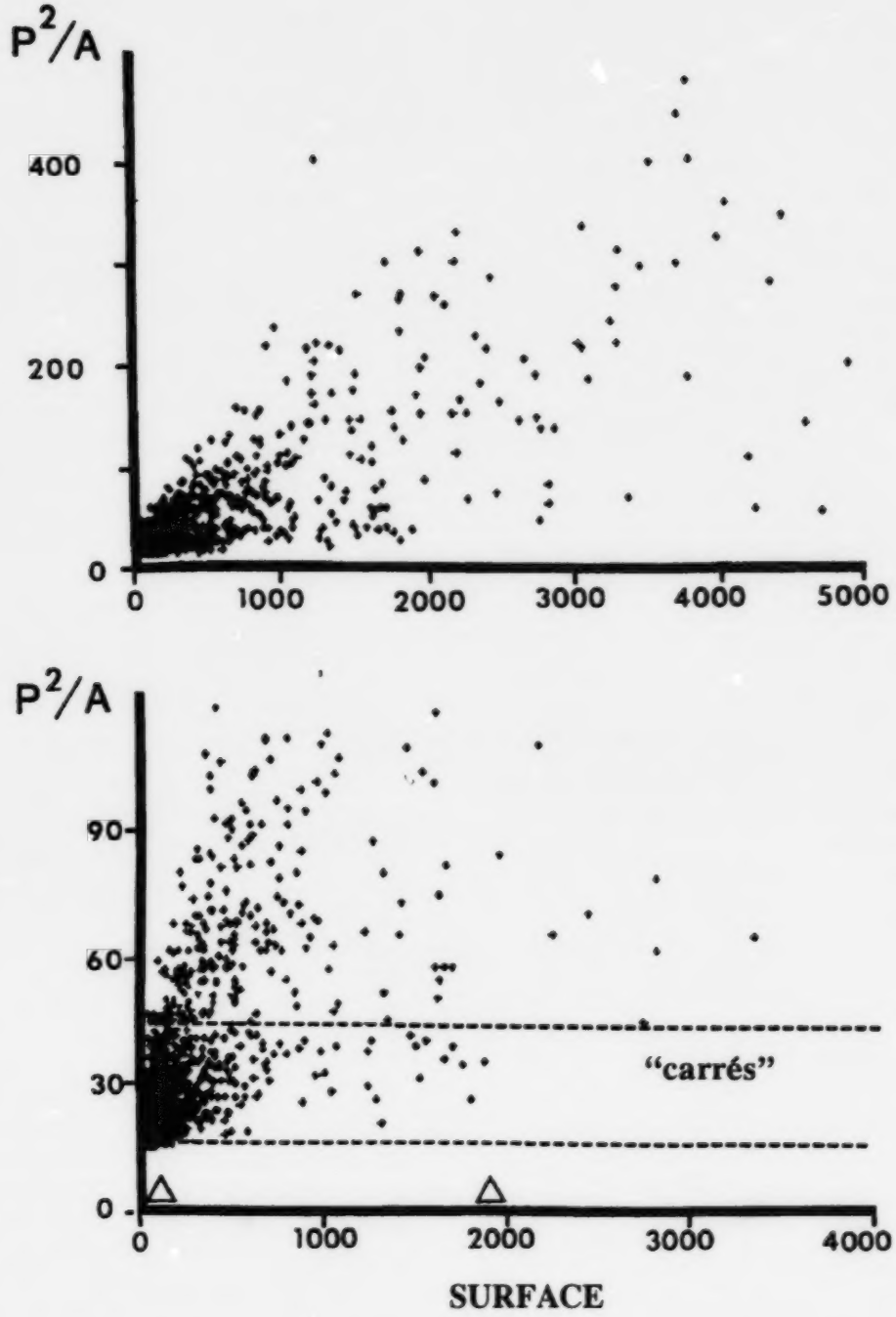


Fig. 9 – Tracé de P^2/A en fonction de A pour 1472 grains d'un même échantillon. Le premier graphique représente toute la gamme des grains analysés. Le second graphique représente les grains dont $P^2/A < 100$ et $A < 3600$ (diamètre = 60 µm). Les droites horizontales correspondent à $P^2/A = 16$ et 45, délimitant la plage des grains qui apparaissent comme des carrés dans les échantillons polis.

ANALYSE

Les échantillons polis, pour lesquels les analyses d'érosion et de dilatation ont révélé des changements dans les relations entre les grains, ont été examinés visuellement dans le but de définir ces relations. On a observé que les grains de pyrite se présentent sous forme de cubes individuels (grains équants dans des échantillons polis) et d'amas de cubes (fig. 10). Les cubes de pyrite sont donc des blocs de construction qui s'assemblent en amas de pyrite. La plupart des cubes viennent en deux grandeurs, environ 10 et 40 µm de côté, même si de nombreux cubes existent en d'autres grandeurs. Les tailles correspondent aux tailles relevées dans les essais de broyage et les analyses de texture. Les relations entre les cubes, les amas et les masses de pyrite confirment que la taille, la forme, l'irrégularité des surfaces et la séparation des grains de pyrite dans le minerai de métal commun de la BMS influent sur la fragmentation du minerai pendant le broyage. Les cubes de pyrite sont liés faiblement, modérément et fortement en amas. Les cubes faiblement liés forment des agrégats de grains de pyrite dans lesquels les pourtours des grains peuvent être délimités par des traits discontinus et des points dans les images par électrons rétrodiffusés de la pyrite dans les échantillons polis. Les grains de pyrite peuvent être délimités dans l'image par une technique de reconstitution des limites de grain au moyen du système d'analyse d'images. La distribution granulométrique des grains de pyrite reconstitués dans l'image de la pyrite correspond à celle des grains de pyrite qui ont été fragmentés pendant 15 minutes dans le broyeur à boulets de laboratoire.

Un résumé des analyses granulométriques et des analyses de texture (tableau 3) renferme trois indicateurs de taille pour la pyrite et le minerai broyé. L'indicateur de petites tailles couvre la plage de 6 à 13 µm; l'indicateur de tailles intermédiaires, la plage de 37,5 à 53 µm; et l'indicateur de grandes tailles, la plage de 106 à 150 µm. Dans le minerai non fragmenté, l'indicateur de petites tailles correspond à la plage des petites tailles pour la plupart des cristaux de pyrite; l'indicateur de tailles intermédiaires correspond à la taille maximale de la plupart des cristaux de pyrite; et l'indicateur de grandes tailles correspond à la taille maximale des amas de pyrite.

Les corré'ations susmentionnées montrent que les grains de pyrite dans un minerai de métal commun influent sur la fragmentation du minerai pendant le broyage dans un broyeur à boulets. En particulier, le minerai tend à se fragmenter en particules ayant la même distribution granulométrique que celle des grains de pyrite dans le minerai non fragmenté. La pyrite dans le minerai non fragmenté se présente sous forme d'amas de cristaux et de cristaux individuels. La liaison entre certains cristaux est faible et le pourtour des cristaux est facile à observer dans des échantillons polis, tandis que la liaison entre d'autres cristaux est forte et le pourtour des cristaux n'est pas apparent. Les cristaux de pyrite faiblement liés se fragmentent pendant un broyage de 15 minutes dans un broyeur à boulets de laboratoire (fragmentation préférentielle). Lorsque le broyage est poursuivi jusqu'à 45 minutes dans un broyeur à boulets de laboratoire, une partie des cristaux et des grains de pyrite moyennement liés est fragmentée (fragmentation en grande partie préférentielle). Un broyage plus poussé fragmente les particules en travers des limites de grains (fragmentation aléatoire).

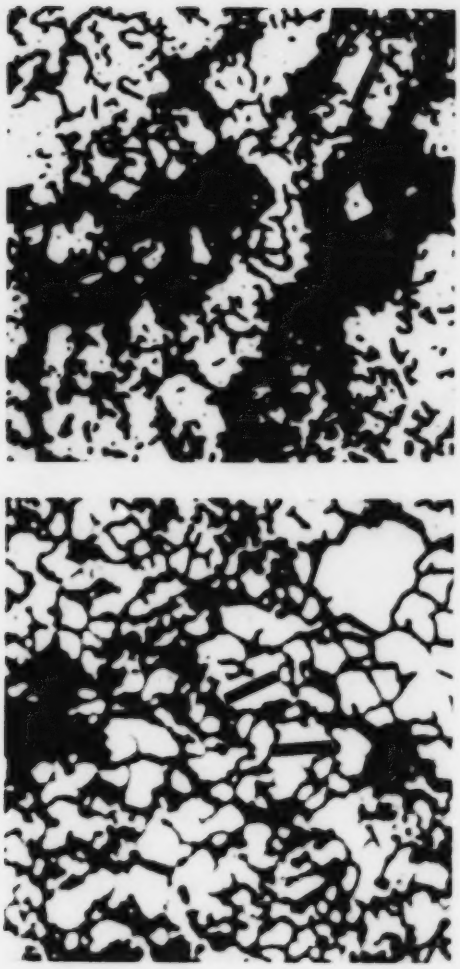


Fig. 10 – Images binaires montrant la pyrite en blanc. Les traits repères superposés aux grains mesurent environ 40 μm. La largeur du trait correspond à 12 μm environ.

Tableau 3 – Résumé des indicateurs de texture

Analyses granulométriques (µm)			
Essai/indicateur	petit	intermédiaire	grand
1. Minerai broyé	13	52	
2. Pyrite	9	37	
3. Quantités de minéraux		37 à 52	104 à 147
Analyses de texture (µm)			
Essai/indicateur	petit	intermédiaire	grand
4. Érosion			
1 scène		33, 42	
18 scènes (1 échant.)		42	
210 scènes (11 échant.)	6		
5. Dilatation			
1 scène	9	33	
18 scènes (1 échant.)	6		
210 scènes (11 échant.)	6		
6. Érosion/dilatation moyenne des étapes (210 scènes)	6, 12	42	
7. P^2/A en fonction de A (1472 grains, 1 échant.)	<10	40	
8. Textures de pyrite – côtés des cubes mesurés (approx.)	10	40	
Résumé	6 à 13	33 à 52	

Les courbes de distribution granulométrique du minerai broyé pendant de longues périodes (fragmentation aléatoire) sont parallèles. On peut en déduire que la fragmentation préférentielle se produit pendant les premières étapes du broyage, et la fragmentation aléatoire, pendant les dernières étapes. Il est vraisemblable que lorsque la fragmentation préférentielle est finie et que la fragmentation est uniquement aléatoire, il y a une forte corrélation entre les observations et les prévisions des modèles de fragmentation aléatoire en ce qui concerne la libération de minéraux.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1. Pour les minerais de métaux communs riches en pyrite et en quartz, comme les minerais de la BMS et de Trout Lake, les analyses de tamisage du produit d'un broyeur commercial et de celui d'un broyeur à boulets de laboratoire après 15 minutes donnent des résultats semblables aux courbes de distribution granulométrique de la pyrite contenue dans le minerai de métal commun non fragmenté.

2. Des discontinuités dans les courbes de broyage du minerai de la BMS sont observées pour les fractions granulométriques de 106 à 150, de 37 à 52 et de 0 à 13 µm. Elles se produisent parce que a) la plupart des grains de pyrite ont moins de 150 µm; b) la plupart des cubes de pyrite qui sont les blocs de construction des grains de pyrite ont moins de 42 µm; et c) la plupart des cubes de pyrite ont plus de 10 µm.

3. Les analyses d'érosion et de dilatation périmétriques sont des techniques efficaces d'analyse rapide des images qui peuvent détecter des changements dans les relations entres les grains de minéraux. Ces changements influent sur la fragmentation du minerai pendant le broyage.

4. L'analyse des images est une technique fiable de détection et de mesure des propriétés des minéraux qui influent sur le broyage dans un broyeur à boulets. La technique est particulièrement utile parce qu'il faut mesurer un grand nombre de grains pour détecter les paramètres appropriés des minéraux. Une fois les paramètres définis par analyse des images, ils peuvent être facilement évalués par des techniques courantes de microscopie du minerai.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants envers M. Raicevic de la Section de traitement des minéraux, CANMET, qui a conduit les essais de broyage, et envers L. Surgis de la BMS qui a fourni les échantillons de minerai. En outre, ils remercient les employés de CANMET suivants : R.G. Pinard qui a participé à l'analyse des images, M. Beaulne qui a préparé les échantillons polis, et J.D. MacLeod qui a dessiné les illustrations du rapport.

RÉFÉRENCES

1. Gaudin, A.M. "Principles of mineral dressing"; New York, McGraw-Hill Book Co.; 1939.

2. King, R.P. "A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding"; *Int J Miner Process* 6:207-1210; 1979.

3. Klimpel, R.R. "Some practical approaches to analyzing liberation from a binary system"; *Process Mineralogy III*; édité par W. Petruk (The Society of Mining Engineers of AIME); New York, N.Y.; pp 305-311; 1986.

4. Lin, C.L., Miller, J.D., Herbst, J.A., Sepulvoda, J.E. et Prisbrey, K.A. "Prediction of volumetric abundance from two-dimensional mineral images"; *ICAM '84, Applied Mineralogy*; édité par W. Park et coll. (The Society of Mining Engineers of AIME); Warrendale, Pa.; pp 157-170; 1984.

5. Finch, J.A. et Petruk, W. "Testing a solution to the King liberation model"; *Int J Miner Process* 12:305-311; 1984.

6. Petruk, W. "Predicting and measuring mineral liberations in ores and mill products, and effect of mineral textures and grinding methods on mineral liberations"; *Process Mineralogy VI*; édité par R.D. Hagni (The Society of Mining Engineers of AIME); Warrendale, Pa.; pp 393-403; 1986.

7. Petruk, W., Pinard, R.G. et Finch, J. "Relationship between observed mineral liberations in screened fractions in composite samples"; *Minerals and Metallurgical Processing* 60-62; 1986.

8. Petruk, W. "The MP-SEM-IPS image analysis system and its application to mineralogy and geochemistry"; *Rapport CANMET* 87-1E; 1987.

9. Petruk, W. et Schnarr, J.R. "An evaluation of the recovery of free and unliberated mineral grains, metals and trace elements in the concentrator of Brunswick Mining and Smelting Corp. Ltd."; *CIM Bulletin* 74:833:132-151; 1981.

10. Smith, M.M. et Petruk, W. "Textural classification using fractal analysis techniques"; *Proceedings of the International Symposium on the Production and Processing of Fine Particles*; CIM; Montréal (sous presse); 1988.

11. Flook, A.G. "The use of dilation logic on the Quantimet to achieve fractal dimension characterization of textured and structured profiles"; *Powder Technol* 21:295-298; 1987.

12. Kaye, B.H. "Specification of the ruggedness and/or texture of a fine particle profile by its fractal dimension"; *Powder Technol* 21:1; 1978.